


УДК 69.07
https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-4-14

Научная статья



Методика проектирования стальных рам переменного сечения из прокатных двутавров

С. В. Щуцкий ✉, С. В. Скуратов, А. А. Лиманцев

Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ svpike1@rambler.ru

Аннотация

Введение. Статья посвящена проблемам подбора наиболее эффективного с точки зрения металлоемкости двутаврового сечения для создания рамы переменного сечения. Из различных вариантов создания переменных по длине элементов рамы в данной работе рассматриваются элементы, образованные из обычных двутавров путем диагонального роспуска стенок с последующей сваркой, как один из наиболее технологичных вариантов. Для получения наиболее эффективного с точки зрения металлоемкости сечения предлагается применение моносимметричного двутавра, составленного из двух различных позиций сортамента.

Материалы и методы. Изучение научных исследований, посвященных проектированию конструкций из двутавров позволило составить методику вычисления оптимальных параметров сечения. Применение данной методики позволяет найти параметры для нахождения наиболее эффективных для применения сечений из существующего сортамента прокатных двутавров.

Результаты исследования. В качестве объекта исследования рассмотрен каркас здания, запроектированного по рамно-связевой схеме из сварных однопролетных рам с элементами переменного сечения (серии шифра 828КМ). Произведен расчёт в соответствии с предлагаемой методикой. Результаты расчета показывают, что применение моносимметричного двутавра, составленного из двух различных двутавров позволяет наиболее полно использовать несущую способность сечения.

Обсуждение и заключение. В результате применения предлагаемой методики получилось сократить массу двутавра переменного сечения по сравнению с серийным, использующимся при аналогичных нагрузках. Результат исследования позволяет сделать вывод о перспективности применения рам переменного сечения, образованных путем диагонального роспуска двутавров различного сечения с последующей сваркой в строительстве промышленных каркасных зданий.

Ключевые слова: стальная рама, переменное сечение, переменная жесткость, диагональный роспуск, двутавр.

Для цитирования. Щуцкий, С. В. Методика проектирования стальных рам переменного сечения из прокатных двутавров / С. В. Щуцкий, С. В. Скуратов, А. А. Лиманцев // Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий. — 2022. — Т. 1, № 4. — С. 4–14. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-4-14

Original article

Methodology for Designing the Steel Frames of Variable Cross-Section from Rolled I-Beams

Sergey V. Shchutsky, Sergey V. Skuratov, Alexey A. Limantsev

Don State Technical University, Gagarin sq., 1, Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ svpike1@rambler.ru

Abstract

Introduction. The article tackles the problem of finding the most efficient in terms of metal consumption I-shaped cross-section for creating a frame of variable section. In this paper from various options of creating the variable in length frame elements the authors study the option of creating the elements from the ordinary I-beams by diagonal slitting followed by

welding as one of the most technologically advanced one. To obtain the most efficient in terms of metal consumption cross-section, it is proposed to use a monosymmetric I-beam composed of two different assortment items.
Materials and methods. The review of scientific works related to the topic of designing structures from I-beams allowed the authors to compile a methodology for calculating the optimal section parameters. The implementation of this methodology makes it possible to draw the parameters for finding the most efficient for application cross-sections from the existing assortment of rolled I-beams.
Results. The object considered in this study is a frame of a building designed as the braced frame structure from welded single-span frames with elements of variable cross-section (code 828KM). The calculation was made in accordance with the proposed methodology. The results of the calculation show that the use of a monosymmetrical I-beam, composed of two different I-beams, gives opportunity to use the load-bearing capacity of the section to the fullest extent.
Discussion and conclusion. In the result of implementation of the proposed methodology, it became possible to reduce the mass of an I-beam of a variable cross-section compared to the serial one used under similar loads. The result of the study allows us to conclude that the use of frames of variable section formed of I-beams of various cross-sections by diagonal slitting and subsequent welding in the construction of industrial frame buildings is highly perspective.

Keywords: steel frame, variable cross-section, variable rigidness, diagonal slitting, I-beam.

For citation. S. V. Shchutsky, S. V. Skuratov, A. A. Limantsev. Methodology for Designing the Steel Frames of Variable Cross-Section from Rolled I-Beams, 2022, vol. 1, no. 4, pp. 4–14. https://doi.org/10.23947/2949-1835-2022-1-4-4-14

Введение. Одной из основных и актуальных проблем современных инженерно-прикладных исследований является ресурсосбережение, имеющее непосредственное практическое значение для строительной отрасли и экономики Ростовской области.

В настоящее время, на фоне изоляции российской экономики от западных стран, увеличивающимися темпами происходит реиндустриализация — восстановление отечественной промышленности [1]. Доля промышленных и промышленно-складских зданий в строительной отрасли увеличивается.

В связи с тем, что наиболее распространенной конструктивной схемой промышленно-складских зданий является металлический каркас из рам с соответствующей системой горизонтальных и вертикальных связей, в работе рассматриваются оптимальные варианты конструирования стальных рам из двутавров переменной жесткости.

На сегодняшний день здания с рамами переменного сечения выпускаются в России многими заводами, оснащенными оборудованием для резки и сборосварки двутавров, например, заводы ООО «ЛИЗСК» г. Липецк и ООО «ЧЗСБ» г. Челябинск. Наиболее массовое применение находят однопролетные рамы с пролетами от 12 до 36 м с шарнирным опиранием стоек на фундамент и жестким сопряжением ригеля с крайними стойками.

Отечественная и зарубежная практика проектирования предлагает следующие варианты конструирования подобных рам:

– использование в качестве стоек и ригелей рам двутавров с перфорированной стенкой;
– использование в качестве стоек и ригелей рам двутавров с гофрированными стенками;
– использование в качестве стоек и ригелей рам двутавров с волнистыми стенками;
– использование в качестве стоек и ригелей рам сварных двутавров со стенкой переменной высоты;
– использование в качестве стоек и ригелей рам с переменной высотой сечения, образованных из прокатных двутавров путем диагонального роспуска стенок с последующей сваркой.

В качестве предмета исследования выбран каркас с применением рам сечением переменной высоты, образованных роспуском и последующей сваркой стенок прокатных двутавров.

Материалы и методы. Основным этапом проектирования каркасов из поперечных рам переменного сечения является статический расчет конструкций на действие внешних нагрузок. Помимо задач статического расчета на данном этапе выполняется поиск эффективной геометрии рам, оптимального распределения жесткостей, оптимизация сечений и технологичности изготовления [2–5]. Для уменьшения массы рамных конструкций рядом исследователей в области проектирования рам переменной жесткости рекомендуется повышать изгибную жесткость сечений за счет увеличения их высоты в местах действия изгибающих моментов с максимальными градиентами, например, в зоне карнизного узла рамы [6]. Настоящий прием позволяет перераспределить изгибающие моменты в зону сопряжения стоек и ригелей рамы, разгрузив пролеты рамы, что позволяет уменьшить металлоемкость и деформативность данных рам.

При расположении исследуемых рамных конструкций в сейсмоопасной зоне, расчет на сейсмические воздействия следует производить в крайних итерациях, так как данные воздействия обычно слабо влияют на усилия в рамных конструкциях вследствие их относительно малой жесткости и массы конструкций каркаса.

Исследованиями в области подбора оптимальных размеров двутавровых сечений [7–9] установлено, что определяющим фактором, влияющим на экономичность изгибаемых двутавров, являются высота сечения и гибкость стенки. В настоящей работе не рассматриваются двутавры, работа стенки которых происходит в закритической стадии, так как в прокатных двутаврах применяется устойчивая стенка, предельная гибкость которой, как правило, не превышает 150 [10].

В рамах переменного сечения максимальные нормальные напряжения в поясах от продольной силы и изгибающего момента действуют на достаточно протяженных участках. При работе таких рам в упругопластической стадии пластические деформации могут распространиться по значительной длине элемента, что может привести к обрушению всей конструкции. Поэтому нормы (СП16.13330.2017 — Стальные конструкции) регламентируют ограничения по развитию пластических деформаций в сечениях рам, вследствие чего такие рамы рассчитываются в упругой стадии. В частности, это выражается в пренебрежении коэффициентом c_x, принимаемым по таблице Е.1 СП16.13330.2017 в зависимости от соотношений площадей полок и стенок рассчитываемых двутавров. В рамках настоящей работы предлагается допущение того, что такого рода напряжения возникают только в карнизной зоне рамы, следовательно, в пролетных сечениях рам переменного сечения допустимо учитывать работу двутавров в упругопластической стадии. Актуальные исследования в области работы балок, испытывающих динамические нагрузки, позволяют сделать вывод о допустимости учета в них пластических деформаций [11, 12].

Чтобы установить размеры зоны допустимых пластических деформаций в числовом значении введем параметр, определяющий вклад продольного усилия на напряженно-деформированное состояние элемента рамы.

При действии предельного изгибающего момента M и предельной продольной силы N в сжатой полке двутавра возникают напряжения, равные в сумме расчетному сопротивлению стали:

$$\sigma_N + \sigma_M = R_y,$$

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W} = R_y,$$

где W и A — момент сопротивления рассматриваемой полки и общая площадь двутавра. Из данной формулы выразим требуемый момент сопротивления:

$$W = \frac{M}{R_y} \cdot \frac{1}{1 - \frac{N}{A \cdot R_y}} \tag{1}$$

Представив M/R_y как W_M — требуемый момент сопротивления сечения при отсутствии продольной силы выражение (1) запишем следующим образом:

$$W = W_M \cdot \frac{1}{1-\frac{\sigma_N}{R_y}} \qquad (2)$$

Из данного уравнения как раз и имеется возможность выразить параметр, определяющий долю напряжения от продольной силы $\psi = \frac{\sigma_N}{R_y}$. При значении этого параметра близкого к нулю, рационально учитывать работу сечения в упругопластической стадии.

Оптимальная высота сечения изгибаемого двутавра находится по известной формуле [13]:

$$h_{opt} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot W \cdot \lambda}\,, \qquad (3)$$

где $\lambda=h/t$ — гибкость стенки двутавра.

В первой итерации принимается $h = h_{opt}$. Для симметричного двутавра площадь полки в зависимости от момента сопротивления равна:

$$A_f = \frac{W}{h} - \frac{t \cdot h}{6} \qquad (4)$$

Подставив вместо значения высоты двутавра значение оптимальной высоты, получим:

$$A_f = \frac{W}{\sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot W \cdot \lambda}} - \frac{t \cdot h}{6} = \sqrt[3]{\frac{2}{3} \cdot \frac{W^2}{\lambda}} - \frac{t \cdot h}{6} \qquad (5)$$

Площадь стенки двутавра:

$$A_w = t \cdot h \qquad (6)$$

Также, подставив в данную формулу значение оптимальной высоты, получим при $t = \frac{h}{\lambda}$:

$$A_w = \frac{\sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot W \cdot \lambda}}{\lambda} \cdot \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot W \cdot \lambda} = \sqrt[3]{\frac{9}{4} \cdot \frac{W^2}{\lambda}} \qquad (7)$$

Подставив (7) в (5), приняв $t \cdot h = A_w$, выразим и площадь полок через момент сопротивления:

$$A_f = 0{,}6552 \cdot \sqrt[3]{\frac{W^2}{\lambda}} \qquad (8)$$

Тогда общая площадь симметричного двутавра:

$$A = 2 \cdot A_f + A_w = 2 \cdot 0{,}6552 \cdot \sqrt[3]{\frac{W^2}{\lambda}} + \sqrt[3]{\frac{9}{4} \cdot \frac{W^2}{\lambda}} = 2{,}6208 \cdot \sqrt[3]{\frac{W^2}{\lambda}} \qquad (9)$$

Конечные преобразования данных формул, включающих параметр ψ, в частности отраженные в монографии [6], при подстановке формулы (2) в формулу (3) и (9) выглядят следующим образом:

$$h_{opt} = \sqrt[3]{\frac{3}{2} \cdot \frac{W_M \cdot \lambda}{1-\psi}} \qquad (10)$$

$$A = 2{,}6208 \cdot \sqrt[3]{\frac{{W_M}^2}{\lambda \cdot (1-\psi)^2}} \qquad (11)$$

Из формулы (10) следует, что оптимальная высота двутавра увеличивается при действии на него сжимающей силы пропорционально параметру $\sqrt[3]{\frac{1}{1-\psi}}$. Фактически сжимающая продольная сила приводит к смещению нейтральной оси сечения и увеличению высоты сжатой зоны стенки, что отрицательно влияет на ее местную устойчивость.

Исследования зависимости величин смещения нейтральной оси [13, 14] от изменения толщины стенки по высоте двутавров, позволяют сделать вывод о том, что влияние смещения нейтральной оси незначительно и при

параметре ψ < 0,2, характерном для рамных конструкций, составляет не более 3 % относительно центра тяжести сечения двутавра с постоянной толщиной стенки. Следовательно, для конструирования элементов рамы переменного сечения нерационально использовать двутавры с различной толщиной стенки, усложняя технологический процесс сварки стенок разной толщины. Также наличие продольной сжимающей силы существенно влияет на увеличение площади полок симметричного двутаврового сечения, поэтому при 0,02 < ψ < 0,1 становится рациональным применение моносимметричных двутавров с развитой сжатой полкой.

Для моносимметричных двутавров моменты сопротивления для сжатой и растянутой полок будут различаться:

$$W_1 = W_M \cdot \frac{1}{1-\frac{\sigma_N}{R_y}};\ W_2 = W_M \cdot \frac{1}{1+\frac{\sigma_N}{R_y}} \quad (12)$$

С учетом коэффициента ψ, формула (12) примет вид:

$$W_1 = W_M \cdot \frac{1}{1-\psi};\ W_2 = W_M \cdot \frac{1}{1+\psi} \quad (13)$$

Тогда соотношение моментов сопротивления полок моносимметричного двутавра будет равно:

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{1+\psi}{1-\psi} \quad (14)$$

Геометрически моменты сопротивления полок будут равны отношению момента инерции сечения (J_x) к расстоянию до центров тяжести рассчитываемых полок (y_1, y_2):

$$W_1 = \frac{J_x}{y_1} = A_{f1} \cdot y_1 + A_{f2} \cdot \frac{y_2^2}{y_1} + \frac{A_w}{y_1} \cdot (0{,}5 \cdot h - y_1)^2 + \frac{A_w \cdot h^2}{12 \cdot y_1} \quad (15)$$

$$W_2 = \frac{J_x}{y_2} = A_{f2} \cdot y_2 + A_{f1} \cdot \frac{y_1^2}{y_2} + \frac{A_w}{y_2} \cdot (0{,}5 \cdot h - y_2)^2 + \frac{A_w \cdot h^2}{12 \cdot y_2} \quad (16)$$

Так как

$$J_x = W_1 \cdot y_1 = W_2 \cdot y_2 \rightarrow \frac{W_1}{W_2} = \frac{y_2}{y_1} = \frac{1+\psi}{1-\psi} \quad (17)$$

Формулы (15) и (16) при $y_2 = h - y_1$, и соотношении (17) принимают вид:

$$W_1 = A_{f1} \cdot 0{,}5h \cdot (1-\psi) + A_{f2} \cdot 0{,}5h \frac{(1+\psi)^2}{1-\psi} + A_w \cdot h \cdot \frac{1+3\psi^2}{6 \cdot (1-\psi)} \quad (18)$$

$$W_2 = A_{f1} \cdot 0{,}5h \cdot (1+\psi) + A_{f2} \cdot 0{,}5h \frac{(1-\psi)^2}{1+\psi} + A_w \cdot h \cdot \frac{1+3\psi^2}{6 \cdot (1-\psi)} \quad (19)$$

Решая данную систему уравнений, в конечном итоге получим формулы для нахождения площади полок, аналогичные (4):

$$A_{f1} = \frac{W_\psi}{h \cdot (1-\psi)} - \frac{A_w}{6} \cdot \frac{1-3\psi}{1-\psi} \quad (20а)$$

$$A_{f2} = \frac{W_\psi}{h \cdot (1+\psi)} - \frac{A_w}{6} \cdot \frac{1+3\psi}{1+\psi} \quad (20б)$$

Суммарная площадь моносимметричного двутавра:

$$A_{ms} = A_{f1} + A_{f2} + A_w \quad (21)$$

Подставляя (20) и (21) в формулу (22) в результате преобразований получим

$$A_{ms} = \frac{2 \cdot W_M}{h(1-\psi^2)} + \frac{2}{3} \cdot \frac{h^2}{\lambda \cdot (1-\psi^2)} \quad (22)$$

Поставляя вместо h значение оптимальной высоту двутавра из формулы (3) получим:

$$A_{ms} = \frac{2{,}6208}{(1-\psi)^2} \cdot \sqrt[3]{\frac{{W_M}^2}{\lambda}} \quad (23)$$

Отношение площади симметричного (11) к площади моносимметричного двутавра:

$$\frac{A}{A_{ms}} = (1+\psi)\cdot\sqrt[3]{(1-\psi)} \quad (24)$$

Введем коэффициент асимметрии моносимметричного двутавра $\beta = \frac{A_{f2}}{A_{f1}}$. Тогда, подставляя выражения (20а) и (20б), и пользуясь формулой (7), получим:

$$\beta = \frac{1-\psi}{1+\psi}\cdot\frac{1{,}42-\psi}{1{,}42+\psi} \quad (25)$$

При большом значении коэффициента асимметрии возможно возникновение ситуации, при которой сжимающая продольная сила будет значительно меньшей в сравнении с принятой при подборе сечения. В этом случае сжимающее усилие не будет компенсировать напряжения в растянутой полке моносимметричного двутавра, что необходимо учитывать при расчете.

В отечественных сериях, в том числе и в серии 828КМ в качестве сжатых и растянутых поясов стоек и ригелей рам применяются прокатные двутавры одинакового сечения. С учетом вышеизложенных положений, в частности наличия в элементах рам значительных продольных усилий, предлагается использовать прокатные двутавры разного профиля, имеющие различные площади полок (асимметрию), с роспуском стенок по диагонали и последующей сваркой.

Сборка прокатных двутавров производится посредством выполнения продольного стыкового шва односторонним механизированным способом на флюсовой подушке. Допускается вышеуказанные швы выполнять механизированным способом в среде CO_2 односторонними (на глубину не менее половины толщины стенок двутавров), за исключением участков в карнизных участках рам, где сварные швы должны быть двухсторонними (на длине 1000 мм в стойках рам и 1500 мм — в ригелях рам). Данное требование накладывает ограничения в применимости различных позиций сортамента двутавров. Согласно таблице 10 ГОСТ 14771-76, для сварного соединения типа С8, элементы сборок, находящихся на противоположных сторонах от стыкового шва, должны иметь одинаковую толщину стенок при допустимом отклонении в 1 мм. Так как данное отклонение может привести к появлению эксцентриситета, следствием наличия которого является закручивание двутавра переменного сечения, в исследуемых рамах принято положение о равенстве стенок в элементах рам. По данному требованию предлагается применять для конструирования отправочного элемента рамы двутавры, имеющие одинаковую толщину стенки.

Результаты исследования. В качестве объекта исследования выбран каркас здания плавательного бассейна, запроектированного по рамно-связевой схеме из сварных однопролетных рам с элементами переменного сечения по шифру 828КМ (рис. 1). Рамы приняты с жесткими верхними узлами и шарнирным опиранием на фундамент. Ригель двускатный с уклоном 10 %. В исходном проекте ригели и стойки получают путем роспуска (по наклонной линии) двутавров 50 Б2 и 55 Б2 по ГОСТ 26020-83 на тавры с последующей кантовкой их на 180° и сваркой. Соединения в узлах рамы на высокопрочных болтах М24 из стали 40Х «Селект». Пролет рам — 24 м, шаг рам — 6 м, высота ригеля — 8,295 м (по крайней оси). Центральная часть ригеля рамы выполнена в виде балки переменного сечения с максимальной высотой в коньке здания. Часть ригеля рамы, примыкающая к карнизному узлу, выполнена отдельной отправочной маркой с максимальной высотой сечения в зоне карнизного узла. Стойка рамы выполнена отдельной отправочной маркой, примыкание к боковой части ригеля рамы осуществлено посредством фланцевого соединения.

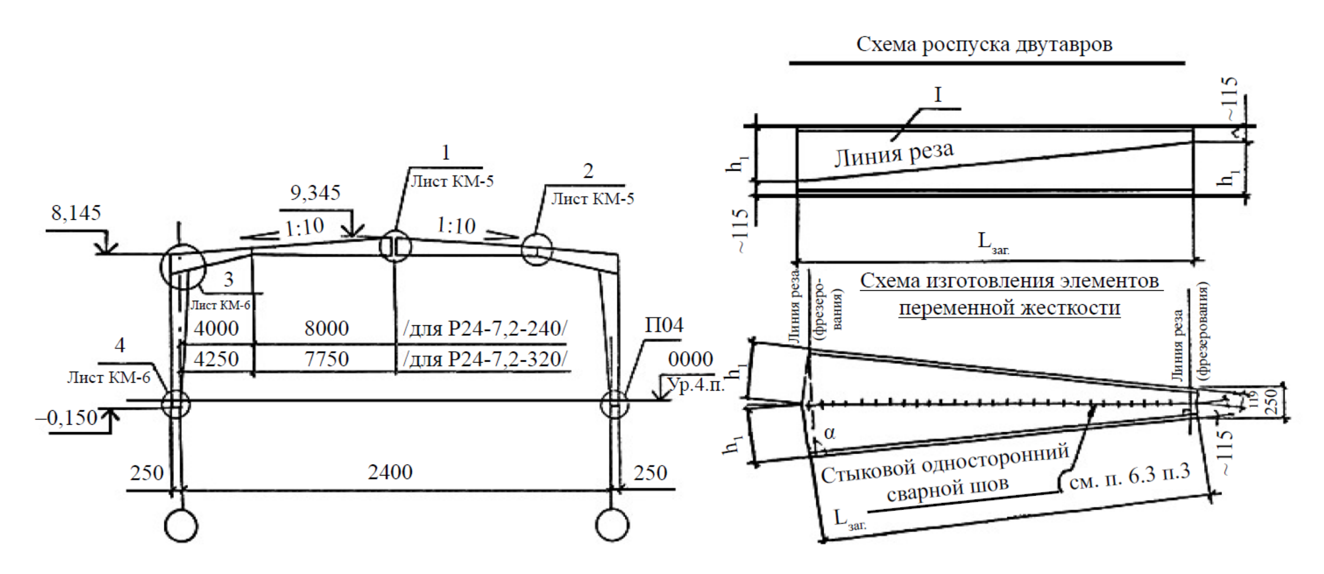


Рис. 1. Схема рамы шифр 828КМ, схема роспуска двутавра

Был произведен линейный расчет рамы методом конечных элементов [15] на действие постоянной и равномерно распределенной снеговой нагрузки. Эпюры внутренних усилий от сочетания этих нагрузок представлены на рис. 2–4.

Рис. 2. Эпюра N

Рис. 3. Эпюра Q

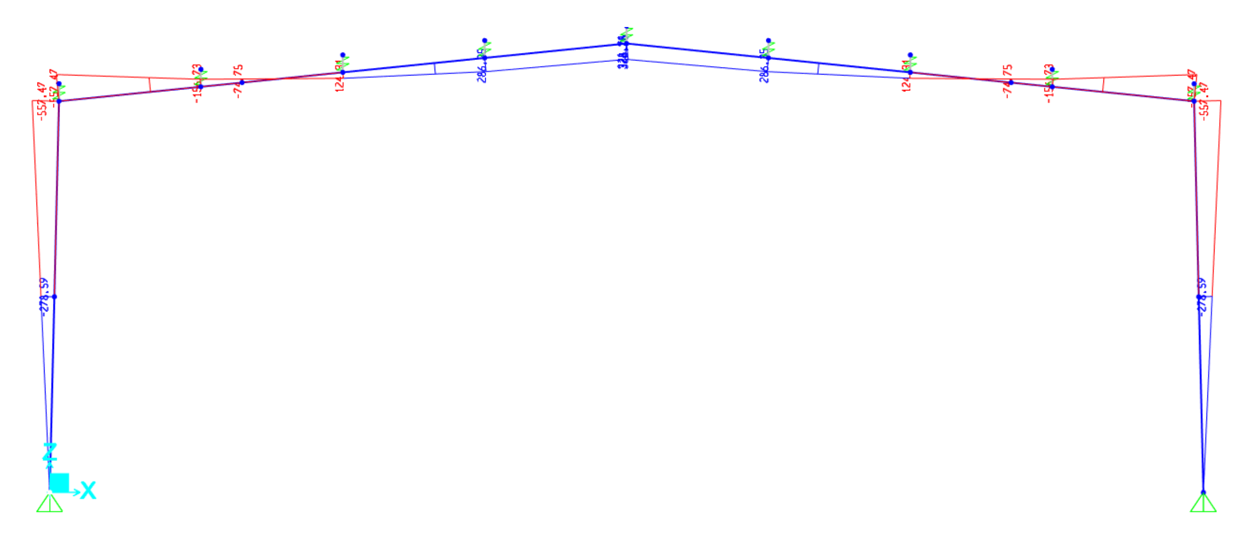
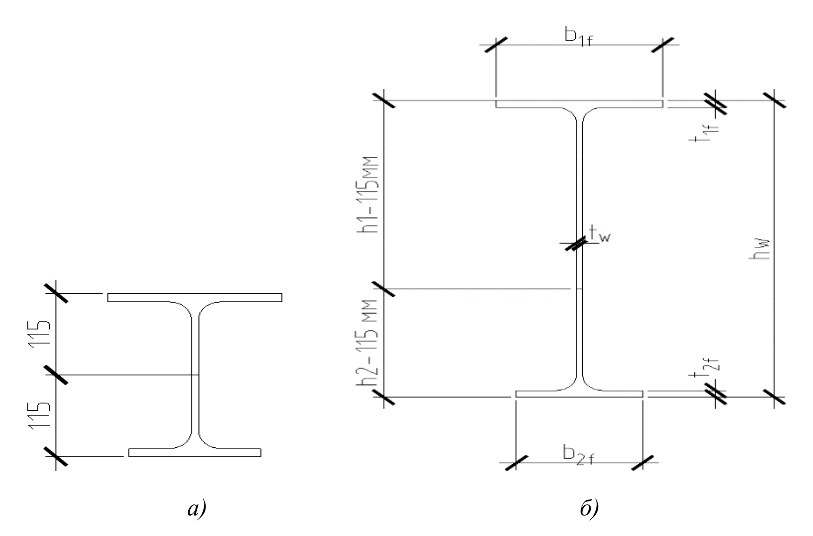


Рис. 4. Эпюра М

Наиболее оптимальное размещение фланцевого соединения в ригеле рамы расположено на расстоянии 4 м от карнизного узла в точке где изгибающий момент меняет знак. Аналог стали Вст3пс6-1, применяемой в серии — сталь С245. На момент разработки типовых конструкций (шифр 828КМ) использование данной стали было обусловлено ее дешевизной в сравнении с низколегированной сталью. В настоящий момент стали, применяемые для балок по ГОСТ Р 57837–2017 указываются с маркировкой Б, и рыночная стоимость низколегированной стали С355 больше на 3–5% для аналогичных балок из стали С255 при существенной разнице в прочности.

В целях унификации минимальная высота профиля составного сечения принимается равной 230 мм, аналогично типовым конструкциям (шифр 828КМ). Данная высота также обусловлена конструктивными требованиями по расположению болтов в фланцевом соединении в точке изменения знака изгибающего момента. На рис. 5 представлены минимальное и максимальное сечение ригеля рамы, образованное путем диагонального роспуска двутавров.



а) *б)*

Рис. 5. Размеры составного сечения ригеля рамы:
а — минимальное сечение, *б* — максимальное сечение

Расчет элементов выполнен по приведенной выше методике. Дискретность сортамента накладывает ограничение на использование двутавров с требуемой толщиной стенки, но недостаточной высотой сечения. Так, в

исследуемом случае расчета сечения в карнизном узле толщину стенки 5 мм имеют двутавры 25Б1 и 20Ш0, однако высоты их совместного сечения будет недостаточно для конструирования составного сечения высотой 640 мм. Ближайшие два двутавра с одинаковой толщиной стенки, подходящие по общей высоте с учетом исключения полок и закруглений с одной стороны сечения — это двутавры 40Б2 и 45Б1.

Вследствие дискретности сортамента возникает необходимость принимать значения высоты сечения ниже оптимальных, что вызывает увеличение площади полок двутавра переменного сечения (рис. 6).

В подобранном сечении высота принята меньше оптимальной, толщина стенки увеличена из-за дискретности сортамента. Учтено выключение части или всей стенки из работы и передача внешнего изгибающего момента и продольного усилия на полки, а также дополнительные требования по местной устойчивости сжатой полки. Значения всех параметров округлены в большую сторону из-за дискретности сортамента. Итоговый ригель рамы состоит из двух прокатных двутавров 45Б1 и 40Б2 общей высотой в карнизной части 616 мм, в точке нулевого момента 230 мм. Габариты сжатой полки 200×13 мм, габариты растянутой полки 199×12 мм (рис. 6).

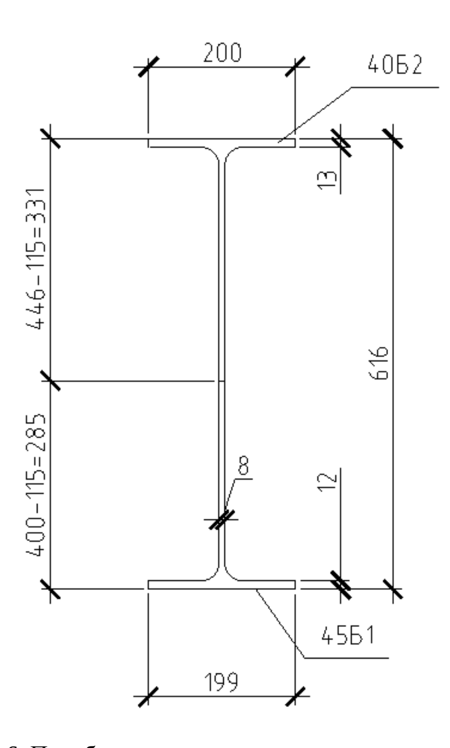


Рис. 6. Подобранное сечение составного двутавра

Обсуждения и заключения. Применение различных позиций сортамента для роспуска и последующей сварки позволило сократить массу двутавра переменного сечения по сравнению с серийной, использующей при аналогичных нагрузках двутавр 45Б2 с диагональным роспуском стенки. Разница в металлоёмкости составила 20,9 %, с поправкой на разницу в стоимости стали — 17,9 %. Результат исследования позволяет сделать вывод о перспективности применения рам переменного сечения, образованных путем диагонального роспуска двутавров различного сечения с последующей сваркой, в строительстве промышленных каркасных зданий.

Библиографический список

1. Наружный, В. Е. Импортозамещение в России: исторический опыт и текущие перспективы / В. Е. Наружный, В. А. Титов, Ю. А. Оболенская // Управленческое консультирование. — 2019. — № 11. — С. 101–112.

2. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости. Под общ. ред. Н. П. Абовского. — М.: Стройиздат, 1978. — 189 с.

3. Скачков, С. В. Решение задачи оптимизации конструктивных параметров безраскосных ферм с поясами из тавров / С. В. Скачков // Легкие строительные конструкции: Сб. науч. тр. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. строит. ун-т, 1999.

4. Запросян, А. О. Оптимизация сечений сварных составных балок / А. О. Запросян // Легкие строительные конструкции: Сб. науч. тр. — Ростов-на-Дону: Рост. гос. строит. ун-т, 1999.

5. Joseph, E. Bowles. Structural Steel Design. McGraw Hill Book Company. 2007. — 536 p.

6. Катюшин, В. В. Здания с каркасами из стальных рам переменного сечения: Монография / В. В. Катюшин. — Москва: Изд-во АСВ, 2018. — 1072 с.

7. Беляев, Б.И. Оптимизация сечений балок с поясами из прокатных тавров и стенкой из листовой стали / Б.И. Беляев // Изготовление металлических и монтаж строительных конструкций: Экспресс-информация. — Москва: ЦБНТИ Минмонтажспецстроя СССР, 1990. — Вып. 4. — 226 с.

8. Milan Jirasek, Zdenek P. Bazant. Inelastic Analysis of structures. JohnWiley & Sons, Ltd., 2008. — 734 p.

9. Каплун, Я. Л. Оптимизация сортамента прокатных профилей: Автореф. дис…. канд. техн. наук. — Москва: Наука, 1971. — 32 с.

10. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. Пособие по проектированию стальных конструкций. — Москва: ЦИТП, Стройиздат, 1989. — 40 с.

11. Лемберг, Е.В. Учет пластических деформаций при колебаниях балки // Конструкторское проектирование и Архитектура. — 2013. — том 3. — № 1. — С. 27–29.

12. Gillman, A.; Fuchi, K.; Buskohl, P.R. Truss-based nonlinear mechanical analysis for origami structures exhibiting bifurcation and limit point instabilities. Int. J. Solids Struct. 2018. — P 80–93.

13. Соболев, Ю.В. О проектировании стальных составных балок рационального сечения / Ю.В. Соболев // Строительство и архитектура. — 1985. — № 1. — С. 18–21.

14. Sidney, M. Levy. Construction Calculations Manual. Elsevier, 2012. — 692 p.

15. Dharmit Thakore. Finite Element Analysis with Open Source Software. Dharmit Thakore, 2014. — 92 p.

Поступила в редакцию 17.11.2022

Поступила после рецензирования 24.11.2022

Принята к публикации 29.11.2022

Об авторах:

Щуцкий Сергей Викторович — заведующий кафедрой «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, ORCID, svpike1@rambler.ru

Скуратов Сергей Викторович — доцент кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ORCID, svskuratov@yandex.ru

Лиманцев Алексей Алексеевич — старший преподаватель кафедры «Металлические, деревянные и пластмассовые конструкции» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1) ORCID, alimantsev@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

С. В. Щуцкий — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, доработка текста, корректировка выводов. С. В. Скуратов — подготовка текста, формирование выводов. А. А. Лиманцев — подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.